

Vplyv ventilácie na teplotný profil požiaru cestného tunela

Influence of Ventilation on the Thermal Profile of the Road Tunnel Fire

Ing. Stanislava Gašpercová, PhD.

Ing. Matej Kadlic

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva
Ul. 1. mája 32, 010 26 Žilina, Slovenská republika
stanislava.gaspercova@fbi.uniza.sk, matej.kadlic@fbi.uniza.sk

Abstrakt

Vzhľadom na to, že experimentálne skúmanie tunela na účinky požiaru nie je možné, na rad prichádza počítačová podpora, ktorá je finančne menej nákladná a pri správne navrhnutých vstupných údajoch sú jej výstupy porovnateľné s experimentálnym skúmaním. Pri požiaroch tunelov je jednou z najdôležitejších častí požiarne vetranie. Jeho hlavnou funkciou je odvádzať spľodiny horenia z miesta požiaru mimo tunelovej rúry a zabezpečiť vhodné životné podmienky unikajúcim osobám a zasahujúcim hasičom. S tým súvisí nielen zadymenie tunelovej rúry ale aj teplota prostredia, v ktorom sa ľudia nachádzajú. Pre porovnanie vplyvu ventilácie na teplotný profil boli vypracované dva požiarne scenáre a to požiarne scenár s použitím požiarnej ventilácie a požiarne scenár bez použitia požiarnej ventilácie. Výsledky simulácie sú znázornené pomocou grafov, ktoré zachytávajú merania na vopred zvolených miestach tunela.

Kľúčové slová

Cestný tunel, požiarne ventilácia, požiar, požiarne modelovanie, Fire dynamics simulator.

Abstract

Since experimental exploration of the tunnel for fire effects is not possible, computer support is available, which is financially less costly and with well-designed input data, its outputs are comparable to experimental tests. Tunnel fires are one of the most important parts of fire ventilation. Its main function is the removal of inflammable burns from the site outside the tunnel tube and the provision of suitable living conditions for escaping persons and the incendiary firefighter. This is related not only to the tunnel pipe but also to the temperature of the environment in which people are located. To compare the effect of ventilation on the temperature profile, two fire scenarios and a fire scenario were prepared using fire ventilation and a fire scenario without the use of fire ventilation. The simulation results are shown using graphs that capture the measurement at selected tunnel locations.

Keywords

Road tunnel, fire ventilation, fire, fire modeling, Fire dynamics simulator.

Úvod

Tak ako aj v iných oblastiach požiarneho inžinierstva aj v prípade modelovania požiarov v cestných tuneloch môžeme použiť dva princípy a to fyzikálne a matematické.

Najpresnejšie výsledky získame pomocou fyzikálneho modelovania pomocou vykonania experimentu v plnej mierke a so zachovaním čo najpresnejších okrajových podmienok. Avšak z hľadiska finančného je práve tento spôsob modelovania ekonomicky najnákladnejší. V prípade tunelov bolo doteraz vykonaných viacero testov po celom svete avšak ich použitie je hlavne kvôli vysokým nákladom a obmedzenom počte skúšobných

tunelov nevhodné. Medzi fyzikálne modely môžeme zaradiť aj skúšobnú miestnosť tzv. room corner test, ktorá sa nachádza v laboratóriu Univerzitného centra energeticky efektívnych budov ČVUT v Prahe.

Matematické modelovanie je založené na výpočtoch, ktoré na základe matematických vzťahov popisujú požiar. Môžeme ich rozdeliť na zónové, CFD a špeciálne modely.

Popis vybraného modelovacieho softvéru

Pre modelovanie správania sa požiaru vo vybranom tuneli sme si zvolili počítačový program Fire Dynamics Simulator (FDS). Tento program sme zvolili z dôvodu, že je v inžinierskej praxi najuznávanejším CFD modelom a zároveň je voľne šíriteľný a umožňuje vytvárať cenné grafické výstupy. Už v minulosti bol využívaný pri modelovaní požiarov automobilov, miestností, nízkopodlažných aj výškových domov, elektrární i tunelov. Tieto výskumy už potvrdili, že simulácia požiaru pomocou počítačového programu FDS kladne ovplyvňuje požiarne bezpečnosť simulovaných objektov nakoľko je možné v ňom modelovať rôzne mimoriadne udalosti, ktoré môžu pri prevádzke objektu nastať [1].

Jedná sa o počítačový model založený na báze Navier-Stokesových rovníc aplikovaných na nízkorýchlostné prúdenie plynov pri požiaroch, šírenia tepla prostredníctvom radiácie a takisto odhadu koncentrácie jednotlivých látok uvoľnených pri požiaroch. Rieši diferenciálne rovnice, ktoré popisujú vývoj požiaru prostredníctvom vstupných dát z textového súboru nazývaného zdrojový kód. FDS delí výpočtový priestor na veľké množstvo buniek, ktoré sú usporiadané do pravouhlej výpočtovej mriežky. Každá bunka mriežky je považovaná za bunku s homogénnymi vlastnosťami. Každá bunka má presne stanovené množstvo paliva, kyslíka, inertných plynov a spľodín horenia a na základe týchto zložiek a ich pomerov sa upravuje spaľovacia reakcia na konkrétne podmienky. Okrem geometrického usporiadania priestoru je nutné určiť okrajové podmienky ako napr. vlastnosti paliva, parametre reakcie horenia, ventiláciu a podmienky okolia.

Ako už bolo spomenuté k spusteniu simulácie je potrebné vytvoriť zdrojový kód, podľa ktorého bude program ďalej pracovať. Prikazy nemusia byť v zdrojovom kóde usporiadané v určitom nemennom poradí, avšak z hľadiska prehľadnosti je vhodné pri vytváraní zdrojového kódu postupovať podľa určitej logickej štruktúry [1]. Ako príklad uvádzame nasledovnú štruktúru, ktorá bola použitá aj pri modelovaní tunela Šibeník:

a) Všeobecné informácie o modeli

Jedná sa o základné informácie o simulácii ako je napr. jej názov, okolitá teplota pred začiatkom simulácie, parametre základného materiálu a pod. Prednastavená okolitá teplota je stanovená na 20 °C, je však možné ju nastaviť na akúkoľvek teplotu.

b) Výpočtový čas a oblasť

Definuje sa doba a oblasť, pre ktorú bude simulácia prebiehať. Doba sa počíta v sekundách a podľa potreby je možné nastaviť prakticky neobmedzené dlhý časový úsek. Oblasť je definovaná prostredníctvom výpočtovej siete zloženej z výpočtových buniek, ktorých rozmer je možné stanoviť s ohľadom na povahu úlohy a potrebnú presnosť výpočtov. Čím je však výpočtová sieť buniek menšia, tým dlhšie výpočty trvajú.

Za výpočtový čas sme stanovili časový úsek 1800 s. Za čas t_0 sme určili čas začiatku požiaru a dohorievania požiaru nastalo v čase 1500 s od začiatku simulácie.

Šírkové usporiadanie tunela je predpísané kategóriou 2T-8,0 v zmysle [2], t.j. každá tunelová rúra má dva jazdné pruhy so šírkou 3,75 m, vodiace pruhy 2x0,25 m a núdzové chodníky so šírkou 1,0 m po oboch stranách vozovky. Dĺžka tunelovej rúry je 588 m. Výška klenby od vozovky je 7,45 m. Základná výška priechodného prierezu je 4,8 m. Výška priechodného priestoru nad núdzovými chodníkmi je 2,2 m. Hrúbka sekundárnej klenby je 300 mm a použil sa na ňu betón triedy C 30/37-XC4, XD3, XF4. Obe tunelové rúry sú navzájom spojené jedným priečnym prepojením [3, 4].

Keďže program FDS na svoje výpočty používa pravouhlú geometriu a delí výpočtový priestor na bunky, ktoré tvoria pravouhlú výpočtovú mriežku musela byť geometria tunela, ktorá má v hornej časti kruhový prierez, prispôsobená týmto požiadavkám. Pre dosiahnutie čo najpresnejšieho vytvarovania priestoru bola zvolená mriežka o rozmere 0,5x0,5x0,5 m, tzn. po prepočítaní bol rozdiel medzi reálnymi podmienkami a pravouhlou geometriou použitou pri výpočtoch len 0,97 %. Celkový počet výpočtových buniek bol pre celý tunel 617 808, pričom v okruhu 10 m od požiaru sa pre jeho detailnejšie modelovanie zvolila jemnejšia mriežka s rozmermi bunky 0,25x0,25x0,25 m.

c) Materiály a okrajové podmienky

Ich správna definícia je základným parametrom pre relevantný priebeh a výsledky celej simulácie. Pre všetky pevné telesá, ktoré sa nachádzajú v priestore horenia alebo ho ohraničujú sa stanovujú najmä ich tepelnotechnické a požiarotechnické vlastnosti ako napr. súčiniteľ tepelnej vodivosti, objemová hmotnosť, merná tepelná kapacita a emisivita. Pre ohraničujúce konštrukcie je potrebné stanoviť aj ich hrúbku, farbu a teplotu. Ak by sme tieto údaje nezadali do zdrojového kódu, program uvažuje so všetkými povrchmi ako s inertnými materiálmi. Okrem špecifikácie materiálov je potrebné definovať aj zdroj horenia a jeho základné charakteristiky. Môžeme tu taktiež definovať otvorenú plochu na hranici výpočtovej oblasti, ktorá slúži na výmenu plynov medzi sledovaným priestorom a okolitým prostredím napr. okná, dvere, portály tunela a pod. Keďže aj ohraničujúce konštrukcie tunela ovplyvňujú vlastnosti požiaru, bolo potrebné správne definovať aj základné charakteristiky týchto materiálov. Ostenie tunela je navrhnuté ako železobetónové.

Hustota betónu:	2 500 kg.m ⁻³ ;
Tepelná kapacita betónu:	1,02 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹ ;
Tepelná vodivosť betónu:	1,74 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ ;
Hustota ocele:	7 850 kg.m ⁻³ ;
Tepelná kapacita ocele:	0,46 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹ ;
Tepelná vodivosť ocele:	45,8 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ .

d) Pevné telesá

Vo výpočtovej oblasti je možné zdefinovať telesá ako strop, steny, ventilátory a pod. Môžeme vytvoriť plné pevné teleso alebo do telesa môžeme umiestniť otvor. Keďže sa jedná o pravouhlý výpočtový priestor telesá sa musia definovať pomocou väčších či menších kvádrov. Ako pevné telesá ovplyvňujúce tok spĺodín horenia boli navrhnuté nielen ventilátory ale aj automobily, ktoré sú umiestnené v tunelovej rúre od jej začiatku až po miesto požiaru. Vetranie v tuneli bolo navrhnuté ako pozdĺžne s tromi sadami ventilátorov v každej tunelovej rúre. Ťah, prietok a rýchlosť prúdenia vzduchu sme simulovali na základe poskytnutých informácií o vetraní tunela Šibeník.

Ventilátory boli typu Banana Jet s prietokom vzduchu 25,6 m³/s a priemerom obežného kola 1250 mm [5]. Zapnutie ventilátorov sme nastavili na 600 s po začiatku simulácie/požiaru.

Pre porovnanie správania sa požiaru v tuneli sme požiar s rovnakými vlastnosťami a okrajovými podmienkami nechali pôsobiť so spustenými ventilátormi ako aj bez spustenia ventilácie. Keďže však stav absolútneho bezvetria je v exteriéri ojedinelý a v rámci tunelov v podstate nemožný, v oboch prípadoch (pri spustenej ventilácii aj bez spustenia ventilácie) sme nastavili rýchlosť prúdenia vzduchu na hodnotu 0,5 m.s⁻¹.

e) Zdroj horenia a definovanie požiaru

Ako zdroj horenia môžeme použiť akúkoľvek kvapalnú alebo tuhú látku. V prípade použitia tuhej horľavej látky je nutné definovať aj iniciačný zdroj, ktorý bude slúžiť na začatie procesu pyrolýzy. Ak za horľavú látku zvolíme kvapalinu, iniciačný zdroj nemusíme popisovať, látka začne horieť samovoľne.

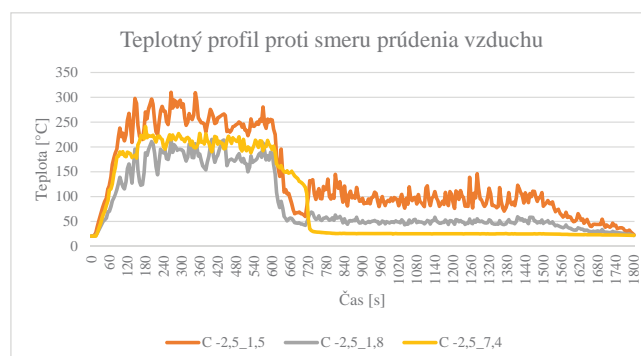
Ak nechceme definovať konkrétny horľavý materiál ale chceme len zistiť správanie sa požiaru v priestore pri určitom tepelnom výkone požiaru je možné zadať do zdrojového dokumentu umiestnenie a maximálny tepelný výkon horáka bez ďalšieho popisu zdroja horenia.

Nakoľko počítačový program FDS dokáže spracovať chemickú reakciu iba pri horení jedného druhu paliva, preto sme museli zvoliť len jedného reprezentanta. Rozhodli sme sa pre motorovú naftu, nakoľko sa jedná o bežné palivo a jeho dym je tmavý, ťažký a toxický. Plochu z ktorej nafta odhorievala sme stanovili na 5x2 m čo sú približne rozmery jedného menšieho nákladného automobilu. Maximálny výkon požiaru, ktorý bol udržiavaný počas celej doby simulácie predstavoval hodnotu 6,25 MW, čo si môžeme predstaviť ako požiar dvoch osobných automobilov alebo jedného menšieho nákladného automobilu.

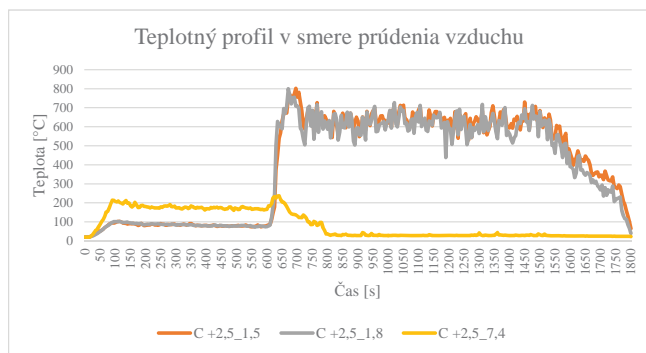
V závislosti od času dosiahnutia maximálneho tepelného výkonu môžeme rozvoj požiaru deliť na štyri typy a to na pomalý, stredne rýchly, rýchly a ultra-rýchly rozvoj požiaru. Pre príspevok sme zvolili ultra-rýchly rozvoj požiaru, kedy maximálny výkon predstavujúci 6,25 MW bol dosiahnutý za 85 s od začiatku požiaru. Tento rozvoj požiaru odporúča aj publikácia *Design fires in road tunnels* [6]. Maximálny výkon požiaru bol udržiavaný počas celej doby simulácie až po čas 1500 s, kedy výkon požiaru lineárne klesal až k nule. Obe dve požiarne scenáre (bez zapnutia ventilácie a so zapnutou ventiláciou) mali kvôli ďalšiemu porovnaniu dosiahnutých výsledkov priebeh tepelného výkonu požiaru rovnaký.

Výsledky simulácií pre návrhové požiarne scenáre

Teploty plynov v uzavretých priestoroch môžeme vo všeobecnosti popísať ako funkciu teploty v závislosti od výšky priestoru tzn. horúca vrstva dymu sa vytvára v hornej časti tunelovej rúry a chladná vrstva v spodnej časti. Pre porovnanie vplyvu ventilácie na teploty prostredia sme porovnávali teplotu plynov vo výške 1,5 m, 1,8 m a 7,4 m nad úrovňou terénu vo vzdialenosti 2,5 m od centra požiaru v smere aj proti smeru prúdenia vzduchu. Výsledky pre požiarne scenár so zapnutou ventiláciou sú znázornené na obr. 1 a 2.



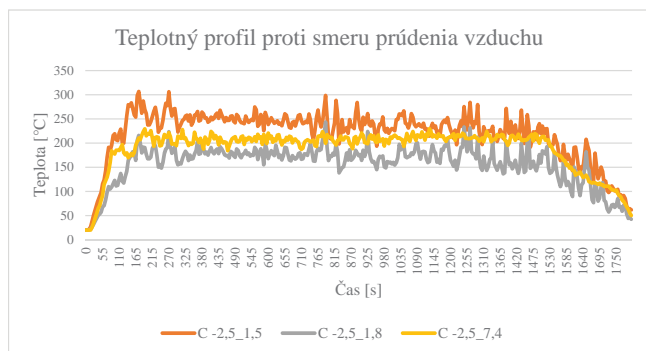
Obr. 1 Priebeh teplôt plynov v rôznych výškach nad úrovňou vozovky proti smeru prúdenia vzduchu (so zapnutou ventiláciou)



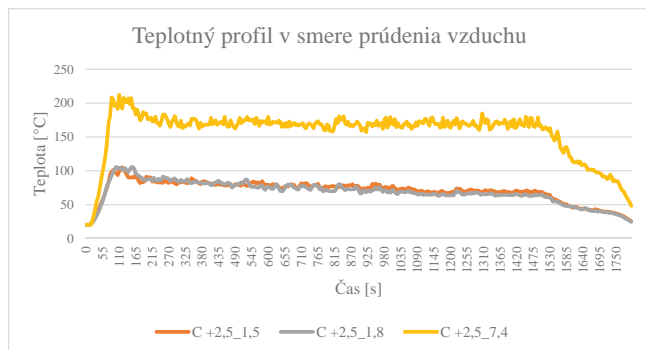
Obr. 2 Priebeh teplôt plynov v rôznych výškach nad úrovňou vozovky v smere prúdenia vzduchu (so zapnutou ventiláciou)

Z obr. 1 je možné usúdiť, že pri porovnaní teploty plynov proti smeru prúdenia vzduchu sa teploty pohybujú od 150 do 300 °C. Po zapnutí ventilácie je v čase 700 s podstatný pokles teploty v prípade najspodnejšej vrstvy vo výške 1,5 m z 250 °C na 100 °C v priebehu 100 s. Teplota prostredia v smere prúdenia vzduchu (obr. 2) sa do zapnutia ventilácie pohybovala tesne pod stropom do 200 °C. Nižšie položené termočlánky, ktoré boli vo výške 1,5 a 1,8 m zaznamenali teplotu pred zapnutím ventilácie do 100 °C. Po zapnutí ventilácie stúpala teplota prostredia na približne 600-700 °C a túto hodnotu si udržiavala až do času 1500 s, kedy postupne klesala až na pôvodnú hodnotu pred začiatkom požiaru, t.j. na 20 °C.

Priebeh teplôt plynov v horiacom priestore v smere a proti smeru prúdenia vzduchu vo výške 1,5 m, 1,8 m a 7,4 m nad úrovňou vozovky bez zapnutia ventilácie je znázornený na obr. 3 a 4.



Obr. 3 Priebeh teplôt plynov v rôznych výškach nad úrovňou vozovky proti smeru prúdenia vzduchu (bez zapnutej ventilácie)

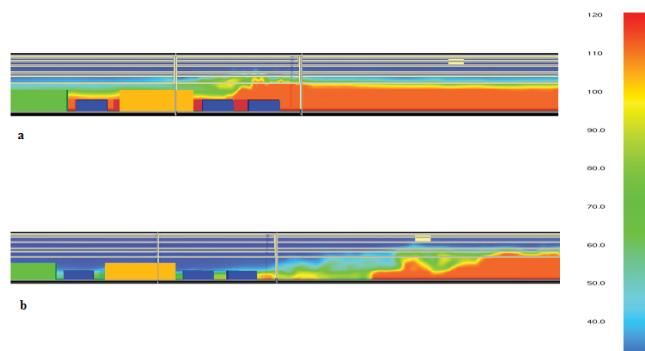


Obr. 4 Priebeh teplôt plynov v rôznych výškach nad úrovňou vozovky v smere prúdenia vzduchu (bez zapnutej ventilácie)

Rozdiel teplôt plynov v požiarom scenári bez zapnutej ventilácie proti smeru prúdenia vzduchu (obr. 3) vo výškach 1,5 m, 1,8 m a 7,4 m nad úrovňou vozovky sa pohyboval v rozmedzí

150-200 °C pre termočlánok umiestnený vo výške 1,5 m. Najvyššie položený termočlánok zaznamenal rozpätie teplôt medzi 250-300 °C. Vzhľadom na to, že sa počas simulácie rýchlosť prúdenia vzduchu nemenila bol priebeh teplôt v jednotlivých výškových úrovniach od času 150 s do 1500 s takmer lineárny. Teplotný profil v smere prúdenia vzduchu (obr. 4) bol narozdiel od teplotného profilu proti smeru prúdenia vzduchu odlišný a to najmä v úrovni najvyššie položeného termočlánku. Termočlánky uložené vo výške 1,5 a 1,8 m dosahovali maximálne teploty 100 °C v čase 100 s od začiatku požiaru a až do konca simulácie postupne teplota v týchto termočlánoch klesala. Termočlánok umiestnený tesne pod stropom tunela dosahoval teploty okolo 170 až 200 °C s maximom v čase 100 s (v rovnakom čase ako nižšie umiestnené termočlánky). Od času 1500 s klesala teplota až na hodnotu 20 °C. Čo súviselo s postupným doháraním požiaru.

Vizualizácia vplyvu ventilácie na teploty plynov v tunelovej rúre je na obr. 5.



Obr. 5 Vizualizácia vplyvu ventilácie na teploty plynov v tunelovej rúre; a - v čase 600 s od začiatku simulácie bez zapnutej ventilácie, b - v čase 650 s od začiatku simulácie (po 50 s od zapnutia ventilácie)

Záver

Na základe porovnania teplôt plynov v jednotlivých výškach nad úrovňou vozovky je možné pozorovať trend vytvárania najhorúcejšej vrstvy plynov pod stropom tunelovej rúry a naopak najchladnejšej vrstvy nad vozovkou tunela. Zároveň je teplotný profil podstatne ovplyvnený aj tým, či sa teploty merajú v smere alebo proti smeru prúdenia vzduchu a ventilácie. V prípade zapnutia ventilácie stúpajú prudkým tempom teploty najmä v horných vrstvách v smere ventilácie, naopak v dolných vrstvách sa teploty plynov podstatne znížili. Proti smeru ventilácie sledujeme opačný trend kedy po zapnutí ventilácie teploty vo všetkých vrstvách výrazne klesajú. Pri požiarom scenári bez zapnutej ventilácie (len s prúdením vzduchu 0,5 m.s⁻¹) je vývoj teplôt vo všetkých vrstvách v smere aj proti smeru ventilácie ustálený počas celej simulácie (do času 1500 s kedy začína pokles teplôt vo všetkých scenároch z dôvodu dohárania požiaru). Z toho usudzujeme, že rýchlosť prúdenia vzduchu 0,5 m.s⁻¹ neovplyvňuje teplotný profil cestného tunela.

Môžeme usudzovať, že ventilácia proti smeru prúdenia vzduchu výrazne znižuje nielen teplotu prostredia a konštrukcií ale tým aj zlepšuje podmienky na hasiaci zásah. Pri vedení hasiaceho zásahu v smere prúdenia vzduchu sú teploty pracovného prostredia podstatne nižšie ako pri vedení hasiaceho zásahu proti smeru prúdenia ventilácie a teda je potrebné vždy usmerňovať príchod záchranných zložiek od portálu, ktorý sa nachádza proti smeru ventilácie.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR na základe zmluvy 014UKF-4/2016 Manuál predikovania kvality prostredia v školských budovách.

Použitá literatura

- [1] WALD, F. a kol. 2017.: *Modelování dynamiky požáru v budovách*. ČVUT Praha, 86 s. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [2] STN 73 7507: 2008: Projektovanie cestných tunelov.
- [3] BULEJKO, P.; ZELENÁK, M.; SVITOK, R. 2015.: *Tunel Šibenik*. In: *Silnice a železnice* [online]. 2015, [cit. 2018-05-05]. Dostupné na internete: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/tunel-sibenik/>.
- [4] ZELENÁK, M.; SVITOK, R. 2014.: *Tunel Šibenik*. In: *Inžinierske stavby* [online]. 2014, [cit. 2018-05-05]. Dostupné na internete: <https://www.asb.sk/inzinierske-stavby/tunely/tunel-sibenik>.
- [5] WITT&SOHN. 2018.: *Ventilátory pre protipožiarne vetranie*. [online]. 2018, [cit. 2018-06-06]. Dostupné na internete: http://www.wittfan.de/files/Produkte/Banana%20Jet/sym_60_hz_banana_jet.pdf.
- [6] MAEVSKI, I.Y. 2011.: *Design fires in road tunnels*. Washington D.C.: Transportation research board, 2011. p. 199. ISBN 978-0-309-14330-1.